

## АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ДЕМІНЕРАЛІЗАЦІЇ ВОДИ

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, професор, Офатенко О.О., магістр, Крутий Г.О., студент  
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

*Аналізуються проблеми дефіциту прісної води. Розглядаються різні методи демінералізації води, проведено їх порівняльний аналіз. Показані перспективи низькотемпературних технологій водопідготовки. Наведені енергетичні і конструктивні переваги виморожувальних установок блочного типу, проведено дослідження їх енергетичних характеристик. Ефективність використання енергії підвищено за рахунок техніко-економічної оптимізації схеми та режимів її роботи. Наведено приклад вибору ефективного холодильного обладнання фірми Danfoss. Визначено термін окупності частотного перетворювача для регулювання потужності компресора.*

*Analyzed the problems of shortage of fresh water. Considered methods of demineralization of water, held their comparative analysis. Showed the prospects of low-temperature water treatment technologies. Presents the energy and the positive benefits of freezing units of block type, studies the energy of its characteristics. Energy efficiency improved by the technical – economic optimization schemes and modes of operation. An example of selecting efficient refrigeration equipment company Danfoss. You Values period frequency converter to power the compressor.*

Ключові слова: технології демінералізації, енергоефективність, блочне виморожування, опріснення, частотне регулювання холодильної потужності.

**Вступ.** За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), більше 1 млрд чоловік у світі не мають можливості користуватися чистою водою для пиття, а близько 2,4 млрд – нормальних побутових санітарно-технічних умов. За висновками ВООЗ, це є причиною смерті щорічно 2,2 млн чоловік, серед них багато дітей. Особливо тривожна ситуація із забезпеченням водою та санітарно-технічними умовами склалася у великих містах країн, що розвиваються, де спостерігається суттєва різниця в забезпеченні санітарних умов між престижними районами і кварталами, населеними біднотою.

Втрати питної води в таких країнах через катастрофічний технічний стан систем водопостачання складають до 40 %. Світовим співтовариством розробляється програма спільних дій щодо поліпшення забезпечення населення планети питною водою та санітарними умовами.

Не менш гостро такого роду проблеми стоять і в Україні, оскільки вона належить до малозабезпечених країн за запасами води, придатної для використання. Вже сьогодні у зв'язку з відсутністю місцевих джерел близько 1200 населених пунктів в Автономній Республіці Крим і в південних областях України частково або повністю користуються привізною питною водою, а водоспоживання постійно зростає.

За даними Міністерства охорони здоров'я України та Міністерства навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України, наведеними у «Національному плані дій з гігієни навколишнього середовища» (розроблений у 1998 р.):

- щорічно до 10 % досліджених проб води з водопровідних мереж не відповідають гігієнічним нормативам за органолептичними властивостями, загальною мінералізацією, вмістом хімічних речовин;
- практично кожна восьма проба питної води із сільських водопроводів і кожна третя з джерел децентралізованого водоспоживання не відповідає вимогам за бактеріологічними показниками;
- кількість аварій, що відбуваються в результаті надзвичайно поганого стану водопровідної мережі, на рівень перевищує відповідну норму в країнах Європи;
- питна вода в деяких регіонах України – значний фактор ризику виникнення інфекційних захворювань.

Сьогодні ця проблема носить соціальний, економічний, медичний, географічний і навіть політичний характер, тому постає важливе питання водопідготовки. Під водопідготовкою розуміють сукупність способів обробки природної води, що застосовуються для приведення її якості у відповідність з вимогами нормативних документів.

Поширені на сьогодні методи демінералізації (термічні, мембранні, іонний обмін, зворотний осмос, електродіаліз) не є енергоефективними та технологічними. Мало поширені поки що методи опріснення виморожуванням мають певні переваги в цьому питанні.

**Технологія опріснення виморожуванням.** При штучному повільному заморожуванні солоні води навколо ядер кристалізації утворюється прісний лід голчатої структури з вертикальним розташуванням

голок льоду. При цьому в міжголчатих каналах концентрація розчину, а отже, і його щільність, підвищуються, і він, як важчий, у міру виморожування осідає вниз. При розтаванні голчатого льоду утворюється прісна вода із вмістом солей до (500-1000) мг/л. Для кращого опріснення іноді застосовується штучне плавлення частини льоду при температурі  $\approx 20$  °С. Вода, що утворюється при таненні, сприяє повнішому вимиванню солей з льоду. Спосіб виморожування достатньо простий і економічний, але вимагає складного і громіздкого устаткування. Саме цей процес демінералізації становить особливий інтерес для багатьох галузей промисловості, де потрібне очищення води від мінеральних солей або отримання питної води високої якості. Цей метод також найбільш перспективний для отримання питної води з морської в прибережних і пустинних зонах різних регіонів світу.

Фізичні принципи, реалізовані процесом демінералізації солоної води виморожуванням, обумовлюють ряд його переваг. Зокрема, кількість енергії, що необхідна для отримання 1 кг чистої води виморожуванням у 7 разів менша, ніж при випаровуванні або дистиляції. Демінералізація виморожуванням нечутлива до мінерального складу початкової води, показник якості питної води по сухому залишку (менше 1,0 кг солей на 1 м<sup>3</sup> води) може бути досягнутий у всіх випадках. Серед методів опріснення солоної води виморожуванням найбільш поширені методи демінералізації з теплообміном через стінку, що охолоджується, заморожування води у вакуумі і пряме заморожування солоної води хладагентом.

У першому випадку можлива порівняно проста технічна реалізація, проте метод має низьку ефективність, питоме енергоспоживання складає (70-110) МДж/м<sup>3</sup>. Установки заморожування води у вакуумі технічно достатньо складні і вимагають стабілізації вакууму (420 Па) у великих об'ємах. Вакуумний опріснювач фірми Колт (США) при продуктивності 400 м<sup>3</sup> на добу прісної води має енергоспоживання (40-45) МДж на 1 м<sup>3</sup> опрісненої води. Загальним недоліком даного методу є великі габарити заморожувача і пов'язані з цим технічні складнощі підтримки в такій крупній системі глибокого вакууму.

Перспективним способом опріснення води є контактне заморожування за допомогою хладагента, що не змішується з водою. В якості агента використовують нерозчинні у воді бутан, ізобутан, метилхлорид, фреони (R114, R115, RC-318). Зокрема, опріснювач фірм Струзерс, Блоу-нокс (США) працює за двоступінчатим холодильним циклом з ізобутаном як холодильним агентом. Завдяки контактній теплопередачі з малою різницею температур (1-2) °С між ізобутаном і водою при заморожуванні досягається висока енергетична досконалість установки і низька вартість. Енерговитрати при продуктивності 19000 м<sup>3</sup> на добу становлять 27 МДж/м<sup>3</sup>. При невисокій вартості електроенергії такий опріснювач конкурентоспроможний з дистиляційною установкою, споживаючою дешеву пару низькотемпературного ядерного реактора.

Основними стримувальними чинниками впровадження способів демінералізації солоних вод виморожуванням є технічна складність і висока вартість відповідних холодильних систем, заснованих на застосуванні крупних компресорних установок, і використання екологічно небезпечних агентів (фреонів).

За останніх 20 років у світі сумарна продуктивність опріснювальних установок збільшилася більш ніж у 50 разів. При цьому спостерігається тенденція створення як крупних опріснювальних систем із продуктивністю 500000 м<sup>3</sup>/доб і більше, так і середніх та малих установок для потреб сільського господарства і отримання прісної води з морської або солоної води, що надходить з глибинних свердловин. Поки зберігається орієнтація на застосування простіших і технологічно відпрацьованих дистиляційних опріснювальних установок. В умовах екологічної кризи одним з можливих напрямів очищення води може бути її демінералізація виморожуванням у разі створення технічно простих і недорогих холодильних систем.

Таким напрямком можна вважати розроблену в ОНАХТ технологію блочного виморожування.

**Технологія опріснення виморожуванням з утилізацією енергії льоду.** Принципова схема установки наведена на рис. 1. Технічною ідеєю схеми є залучення до регулювання продуктивності холодильної машини частотного перетворювача. Справа в тому, що система має надійно функціонувати як у першому циклі (при відсутності льоду в плавителі), так і в наступних циклах, коли йде плавлення льоду, підвищується енергетична ефективність холодильного циклу, зменшується величина холодильної потужності. Зниження холодильної потужності регулюючим вентиляем не є енергетично доцільним засобом. Використання у схемі частотного перетворювача дає змогу перестроювати холодильну машину на необхідну продуктивність при ефективному використанні електричної енергії. Істотно, такий перетворювач має окупатися за рахунок економії енергії. Зробимо аналіз економічної ефективності схеми (рис. 1).

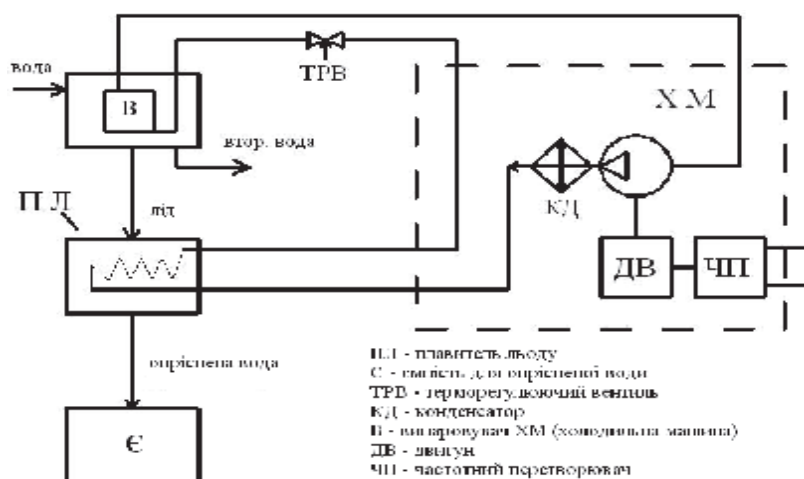


Рис. 1 – Схема опріснювальної установки

**Аналіз енергетичної та економічної ефективності.**

Загальне рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q = c_{p_p} \cdot V_p \cdot \rho_p \frac{\partial t_p}{\partial \tau} + \Omega F_l \frac{dr_l}{\partial \tau} + Q_{nom} \quad (1)$$

З урахуванням наведених припущень для безрозмірної координати  $x = (r_l - r_i) / (r_k - r_i)$  визначається безрозмірний час виморожування:

$$Fo = \frac{Ph}{2(n+1)} \left(1 + \frac{2}{Bi_T}\right) \quad (2)$$

де  $Bi_T$  – число Біо теплове:

$$Bi = \alpha_x \cdot r_T \left( \frac{\ln r_k / r_T}{\lambda_T} + \frac{\ln r_l / r_k}{\lambda_l} \right),$$

$Ph$  – число фазового переходу;

$$Ph = \frac{\rho_p \cdot \Omega}{\rho c_{p_l} (t_p - t_k)}, \quad (3)$$

де  $n$  – константа, яка характеризує форму блоку льоду, для циліндра  $n = 1$ ;  $\alpha_x$  – коефіцієнт тепловіддачі від холодильного агента до стінки кристалізатора, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $r_T$  – внутрішній радіус стінки кристалізатора, м;  $r_k$  – радіус концентратора, м;  $r_l$  – радіус блоку льоду, м;  $\lambda_k$  – теплопровідність стінки кристалізатора, Вт/(мК);  $\lambda_l$  – теплопровідність льоду, Вт/(мК);  $\rho_p, \rho_l$  – щільність розчину і льоду, кг/м<sup>3</sup>;  $\Omega$  – питома теплота кристалізації, Дж/кг;  $c_{p_l}$  – питома теплоємність льоду, Дж/(кгК).

Наведена модель добре відображає тепловий стан системи, але не враховує особливостей масопереносу на кордоні "лід-розчин" при концентруванні харчових рідин, які є складними багатокомпонентними системами. Тому, для визначення дійсного часу кристалізації необхідно ввести коригувальний коефіцієнт, який врахував би зазначену специфіку. З урахуванням зміни ентальпії твердої фази і особливостей масопереносу на кордоні "лід-розчин" дійсний час процесу складе [8]:

$$\tau = \tau_0 \Psi_1 \Psi_2 \quad (4)$$

де  $\Psi_1$  – коефіцієнт, що враховує зміну ентальпії твердої фази:

$$\Psi_1 \approx 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{Bi_T}{Bi_T + 1} \right)^{2/3} \left( \sqrt{1 + 2 \frac{F_l r_l / V_l}{Ph}} - 1 \right) \quad (5)$$

де  $F_l$  – площа поверхні блоку льоду, м<sup>2</sup>;  $V_l$  – обсяг блоку льоду, м<sup>3</sup>.

У співвідношенні (4)  $\Psi_2$  – коефіцієнт, що враховує специфіку масообмінних процесів при блочному виморожуванні

$$\Psi_2 = A (Bi_l)^K; \quad (6)$$

де  $Bi_d$  – число Біо дифузійне

$$Bi_d = \frac{\beta \cdot r_n \ln(r_L / r_K)}{D} \quad (7)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт інтенсивності масопереносу від розчину до блоку льоду, м/с;  $D$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с.

Алгоритм передбачає процедуру розрахунку тривалості процесу виморожування ( $\tau$ ), поточної концентрації розчину ( $C_i$ ), поточного значення діаметра блоку льоду ( $d_n$ ) та його об'єму ( $V_n$ ). В розрахунках прийняті значення щільності льоду  $\rho_L = 917 \text{ кг/м}^3$ , його теплопровідності  $\lambda_L = 2 \text{ Вт/мК}$ ; питомої теплоти фазового перетворення  $\Delta h_{1,2} = 333 \text{ кДж/кг}$ ; питомої теплоємності  $Cp_2 = 2,05 \text{ кДж/кгК}$ . Товщина шару льоду визначалась із кроком  $\Delta X = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Для першого кроку розрахунку  $X = \Delta X$ . Розрахунок ведеться зі сталою кріоскопічною температурою ( $t_k$ ), а при розрахунку щільності розчину ( $\rho$ ) враховується ще й його температура ( $t$ ). Для кожного значення  $X$  та температури кипіння ( $t_0$ ) визначається число фазового перетворення  $Ph$ , яке дає можливість визначити час процесу ( $\tau_{min}$ ), діаметр блоку льоду ( $d_n$ ), його об'єм ( $V_n$ ) та масу ( $M$ ). Із матеріальних балансів визначається об'єм ( $V_{жi}$ ) та її концентрація ( $C_i$ ). Методика передбачає розрахунок числа  $Ph$  за умовою  $Bi \rightarrow \infty$ . Поправку, що визначає вклад дійсного значення числа  $Bi$ , знайдено за результатами експериментального моделювання.

Розрахунок проведено для апарата, що вміщує  $V_n = 4 \text{ л}$  води. В апараті використовуються циліндричні кристалізатори, радіус труби випарника становить  $0,05 \text{ м}$ , а її висота  $h = 1 \text{ м}$ . Саме на такому апараті виконано експериментальні дослідження. Порівняння результатів дає можливість встановити реальні значення числа  $Bi$  та підвищити точність розрахунків.

Результати експериментів подано на рис. 2.

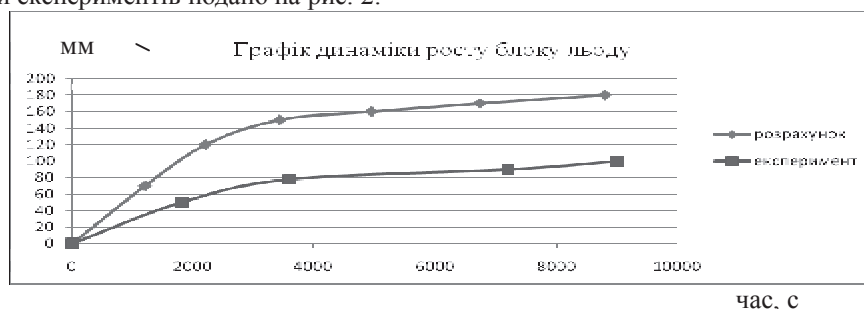


Рис. 2 – Кінетика кристалізації льоду

З графіка видно, що поправочний коефіцієнт дорівнює  $\psi = 2,5$ . Тому надалі в розрахунках  $\tau$  рахується за такою формулою:

$$\tau = \psi \tau_{min} \quad (8)$$

Подальший аналіз проводимо для такої самої конструктивної компоновки. Змінюються в розрахунках режими кристалізації. Відповідно температури кипіння холодильного агента становлять: для першого режиму  $t_0 = -8 \text{ }^\circ\text{C}$ , для другого  $t_0 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$ , а для третього  $t_0 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$  (табл. 1).

Таблиця 1 – Загальні результати розрахунків

	$t_x = -8$				$t_x = -12$			$t_x = -15$		
	Ph	$\tau_{min}, \text{ с}$	$\tau, \text{ с}$	Дл, м	Мл, кг	Ph	$\tau_{min}, \text{ с}$	$\tau, \text{ с}$	Дл, м	Мл, кг
Ph	22.163	22.163	22.163	22.163	14.775	14.775	14.775	11.82	11.82	11.82
$\tau_{min}, \text{ с}$	137.5	550	1237.5	2200	92.5	370	832.5	74	296	666
$\tau, \text{ с}$	3600	5400	7200	10800	3600	7200	10800	3600	7200	10800
Дл, м	0,245	0,273	0,315	0,35	0,245	0,273	0,315	0,245	0,273	0,315
Мл, кг	6,2	9,3	12,4	18,6	6,2	12,4	18,6	6,2	12,4	18,6

Дані табл. 1 відносяться до одного кристалізатора. Наступним кроком проектування є вибір компресора, аналіз холодильного циклу, впливу марки холодильного агента та способу регулювання холодної потужності на техніко-економічні характеристики установок.

**Техніко-економічний аналіз опріснювача блочного типу.** Теоретично необхідна холодна потужність для функціонування  $Z$  кристалізаторів дорівнює

$$Q = \frac{M_{жi} \cdot \Delta h_{1,2}}{\tau_i \cdot 60} Z [\text{кВт}] \quad (9)$$

Після першого циклу підключається у роботу плавитель льоду, який дає можливість як мінімум 25 % енергії льоду повернути в холодильний цикл. Відповідно, холодильна потужність компресора буде знизена. Компресор вибирається за допомогою програмного продукту Danfoss Forsee (табл. 2).

Таблиця 2 – Технічні характеристики компресорів

Model	t <sub>0</sub> , °C	Technology	Voltage	Cooling capacity (W)	Power input (W)	Mass Flow (kg/h)
VTZ171-G	-8	Reciprocating	400/575/3	30112	8573	722
VTZ215-G	-12	Reciprocating	400/575/3	30109	9826	568
VTZ242-G	-15	Reciprocating	400/575/3	30109	11012	677

Розрахунок ведеться так, що установка працює у дві зміни. Компресор працює 960 хвилин, або 16 годин. Приймаємо вартість кіловат\*години електроенергії 0,5 гривні, а кількість робочих днів у році 220. Перші 3 години потужність становить 40150 Вт, потім потужність з використанням частотного перетворювача знижується до 30112 Вт і знаходиться на цьому рівні решту 12 годин. Таким чином використання частотного перетворювача знижує використання енергії на 25 %.

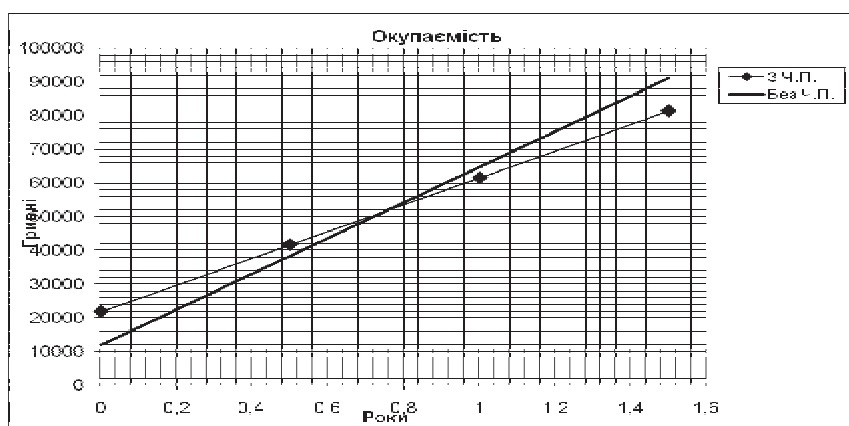


Рис. 3 – Термін окупності системи з частотним перетворювачем

Вартість частотного перетворювача VLT HVAC становить 1200 євро або 9840 гривень за курсом НБУ на початок 2009 р. Результати аналізу наведено на рис. 3. Наведений графік показує, що термін окупності частотного перетворювача становить 0,7 року.

**Висновки.** Опріснення води виморожуванням – це ефективний та надійний спосіб водопідготовки. Перспективним напрямком удосконалення обладнання для очищення води є впровадження апаратів блочного виморожування, де енергетичні втрати зведено до мінімуму і конструкція значно спрощена.

Енергетично ефективним є організація в апаратах блочного типу процесу кристалізації при температурі (-8...-10) °C та комплектація їх енергоефективним обладнанням фірми Danfoss. Так, термін окупності частотного перетворювача для регулювання холодильної потужності не перевищує 0,7 року.

#### Література

1. Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды. – Минск, 2005.
2. Дытнерский Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация. – М.: Химия, 1978.
3. Хванг С.-Т., Каммермейер К. Мембранные процессы разделения/Пер. сайга. – М.: Химия, 1981.
4. Чернозубов В.Б., Подберезный В.Л., Токманцев Н.К. Техника термического опреснения воды в системах водоподготовки и ликвидации соледержащих промышленных стоков. //Экология и технология. – Москва, 1994.
5. Ресурсы [www.bibliotekar.ru/](http://www.bibliotekar.ru/)
6. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств. – Одесса: Полиграф, 2008. – 244 с.
7. Ресурс <http://www.Danfoss.com/>
8. Бурдо О.Г., Мілінчук С.І. Моделювання процесів блочного виморожування з рециклінгом льоду // Зб. наук. праць ОНАХТ. – Одеса, 2009. – Вип. 35. – С.56-60.